

# Modelado para la predicción de enfermedades en cultivos de alto valor comercial

**Enrique Bombelli<sup>2</sup>, Ricardo Moschini<sup>3</sup>, Eduardo Wright<sup>2</sup>, María Virginia López<sup>2</sup>, María del Carmen Fabrizio<sup>2</sup>**

<sup>2</sup> Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Av. San Martín 4453 (C1417DSE), Ciudad Autónoma Buenos Aires, Argentina

{bombelli, wright, mvlopez, fabrizio, barberis, mrivera}@agro.uba.ar

<sup>3</sup>Instituto de Clima y Agua. INTA Castelar. Los Reseros y Las Cabañas s/n. B1712WAA. Castelar. Prov. de Buenos Aires, Argentina

*rmoschini@cnia.inta.gov.ar*

*Recibido el 11 de Diciembre de 2012, aprobado el 22 de Enero de 2013*

## Resumen

Para predecir el comportamiento de enfermedades de plantas, mediante la construcción de modelos matemáticos, se evaluó la severidad de manchas foliares ocasionada por el hongo *Alternaria tenuissima*, en plantaciones de arándano alto (cultivar O'Neal) en tres localidades: San Pedro (S 33° 43' - W 059° 41'), Concordia (S 31° 24' - W 058° 02') y Gualaguaychú (S 33° 01' - W 058° 31'), durante los ciclos epidémicos primavera-verano-otoño de 2008/09 y 2009/10. Los mejores modelos simples de regresión logística de respuesta binaria integraron a Snc (grado de senescencia foliar) y a DTxNP (días con temperaturas entre 16 y 36°C), con precisiones de predicción de 93,8% y 78,5% respectivamente. El mejor modelo de respuesta ordinal integró a la interacción FPr\*DTxNP (días con precipitación > 0,2 mm\*días con temperaturas entre 16 y 36°C) y a Snc, con una precisión de predicción de 86,2%.

**PALABRAS CLAVE:** EPIDEMIOLOGÍA - MODELOS PREDICTIVOS - MANEJO DE ENFERMEDADES - ARÁNDANO ALTO - *Alternaria tenuissima*.

## Abstract

The construction of mathematical models to predict the behavior of plant diseases requires the use of methods for collecting data related to the disease, the host and the environment. The severity of leaf spot, caused primarily by the fungus *Alternaria tenuissima*, highbush blueberry plantations (cultivar "O'Neal") was evaluated in three locations: San Pedro (S 33° 43' - W 059° 41'), Concordia (S 31° 24' - W 058° 02') and Gualaguaychú (S 33° 01' - W 058° 31'), epidemic cycles during spring-summer-autumn 2008/09 and 2009/10. The best simple logistic regression models for binary response integrated into Snc (degree of leaf senescence) and DTxNP (days with temperatures between 16 and 36°C), with prediction accuracies of 93.8% and 78.5% respectively. The best model for ordinal response interaction joined FPr\*DTxNP (days with precipitation > 0.2 mm

**KEYWORDS:** EPIDEMIOLOGY - PREDICTION MODELS - DISEASE MANAGEMENT - Highbush blueberry - *Alternaria tenuissima*.

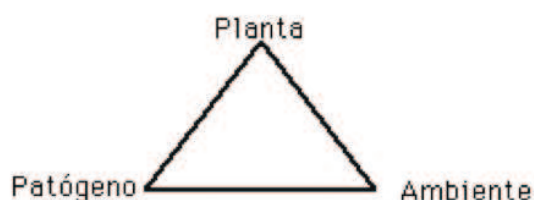
<sup>1</sup> El presente artículo forma parte de la tesis presentada para la maestría Ingeniería en Sistemas de la Información - Facultad Regional Buenos Aires, bajo la dirección de la Dra. Zulma Cataldi.

\*\* Se desea destacar la colaboración en este proyecto de Guillermo Barberis y Marta Rivera.

## Introducción

Las enfermedades que afectan a los cultivos, causan pérdidas significativas, lo cual resulta importante desde el punto de vista de la alimentación a escala mundial (De Wolf e Isard, 2007). Las enfermedades explican por lo menos el 10% de pérdidas de la cosecha global y son, en parte, responsables del sufrimiento de ochocientos millones de personas que carecen de una alimentación adecuada (Strange y Scott, 2005). Estadísticas como éstas, son las que motivan a muchos fitopatólogos a buscar nuevas formas de disminuir el impacto de las enfermedades en la cosecha (De Wolf e Isard, 2007).

De hecho, la fitopatología se dedica al desarrollo y uso de prácticas que reducen el efecto nocivo de una enfermedad sobre lo que será nuestra comida (Maloy, 1993). Estas prácticas deben ser económicamente posibles de llevar a cabo y aceptables desde lo ambiental (Campbell y Madden, 1990). La comprensión de los factores que desencadenan el desarrollo de epidemias vegetales, son esenciales si deseamos crear y ejecutar estrategias eficaces para la gestión de la enfermedad. La interacción sincrónica entre el hospedante, el patógeno, y el ambiente, gobierna el desarrollo de la enfermedad (Figura 1).



**Fig. 1. Triángulo epidémico (De Wolf e Isard, 2007)**

Estas interacciones se pueden conceptualizar como una secuencia continua o ciclo de acontecimientos biológicos que incluyen inactividad, reproducción, dispersión, y patogénesis (De Wolf e Isard, 2007). Aunque los fitopatólogos saben y reconocen desde hace tiempo la importancia de estos acontecimientos, Gaumann (1950) fue el primero en evaluar críticamente la progresión de acontecimientos que llevan al desencadenamiento de la enfermedad (Campbell y Madden, 1990; Maloy, 1993). Gaumann (1950) denominó a esta secuencia continua de

eventos "cadena de la infección", sin embargo, más recientemente han entrado en boga los términos "ciclo de la enfermedad" o "ciclo de la infección" (Maloy, 1993; Kranz, 2003). La descripción y la cuantificación del ciclo de la enfermedad es la base fundamental de la epidemiología vegetal y constituye la llave para desarrollar una gestión eficaz de la misma (De Wolf e Isard, 2007).

La cuantificación de la distribución espacial de la enfermedad proporciona importante información sobre potenciales fuentes de inóculo, así como también la extensión de la misma en una región agrícola (De Wolf e Isard, 2007). El poder predecir cuándo una enfermedad aumentará a un umbral que cause pérdidas económicamente significativas, constituye uno de los usos más importantes de la epidemiología vegetal (Campbell y Madden, 1990). La predicción de la enfermedad en días o semanas antes de que una epidemia ocurra, permite que los productores respondan de manera oportuna y eficiente ajustando las prácticas de gestión de cultivos (Maloy, 1993). Dado un plazo de ejecución suficientemente largo, las predicciones de la enfermedad podrían ayudar a los productores a decidir qué cultivares utilizar y cuándo sembrarlos. Podría ayudarles también a programar la fertilización, la irrigación, la rotación de cultivos, y otras prácticas culturales (De Wolf e Isard, 2007).

Por otra parte, una predicción de bajo riesgo de ocurrencia de la enfermedad, puede dar lugar a un uso reducido de pesticidas, con positivas consecuencias económicas y ambientales (De Wolf e Isard, 2007).

## Contexto

De las muchas enfermedades que amenazan al cultivo de arándano en Argentina, *Alternaria tenuissima* es el patógeno de mayor incidencia y prevalencia (Wright et al., 2005; Wright et al., 2007; Wright y Pérez, 2007), responsable de pérdidas de hasta un 20% en poscosecha (Wright et al., 2003-b; Wright et al., 2004; Wright et al., 2010).

Se trata de un hongo común y abundante en el aire, así como en el suelo, en las semillas y en productos agrícolas. Incluye especies tanto fitopatógenas como saprófitas, conocidas por producir metabolitos, sobre todo fitotoxinas,

que desempeñan un papel importante en la patogénesis de las plantas. Las que producen metabolitos tóxicos en las plantas infectadas y/o en los productos agrícolas, pueden contaminar los alimentos y provocar efectos adversos en animales. La sintomatología en arándano es muy variable, aunque la más común consiste en manchas foliares, ocasionando también pudrición de frutos en pre y poscosecha.

Tratándose de un patógeno necrotrófico<sup>2</sup>, su control preventivo consiste en eliminar órganos afectados, disminuir la humedad foliar y evitar condiciones de estrés, manteniendo el cultivo bien fertilizado y regado. Cuando aparecen los primeros síntomas en hojas y/o tallos, se recomienda aplicar fungicidas (Rivera et al., 2009). Para el caso que nos ocupa, los fungicidas foliares constituyen la principal herramienta a utilizar para minimizar los daños causados. Pero si se busca una estrategia de control químico basada en la ocurrencia de condiciones meteorológicas favorables al progreso epidémico, es necesario contar con modelos matemáticos que cuantifiquen la relación ambiente/enfermedad.

En Argentina no se dispone hasta el presente de observaciones de severidad final de la enfermedad que permitan encarar el desarrollo de modelos empíricos con base meteorológica, para predecir niveles de ocurrencia de la enfermedad.

## Metodología y objetivos

La ocurrencia, desarrollo y dispersión de enfermedades de cultivos, depende de los efectos integrados del patógeno, hospedante y condiciones ambientales.

El productor puede implementar una serie de prácticas de manejo que modifican este sistema interactivo, con el objeto de reducir las pérdidas atribuidas a enfermedades y de esta forma incrementar los rendimientos de los cultivos, bajo el marco de sustentabilidad exigible a los sistemas productivos.

Para apoyar al manejo táctico y estratégico de enfermedades de cultivos, muchos esfuerzos de investigación se concentran en el desarrollo de modelos que simulan el progreso epidémico y/o el nivel final de enfermedad, basados en

algunos o todos los factores que expresan la enfermedad (patógeno, hospedante, ambiente). Dichos modelos se desarrollan analizando información observada de las enfermedades y de la meteorológica del pasado reciente. Se trata de explicar la variación de la enfermedad a través de variables meteorológicas que captan la variabilidad del clima regional, en un intervalo temporal de corta duración.

Esta metodología responde a los sistemas de pronóstico empíricos o deductivos, muchos de los cuales son de gran utilidad y funcionales (datos actuales e históricos de registros de enfermedad y condiciones ambientales de un sitio dado). Esto resulta en la formulación de reglas que deben cumplirse antes que se produzca el desarrollo de la enfermedad, como las establecidas para el tizón tardío de la papa (*Phytophthora infestans*) (Hyre, 1954). Coakley (1988) sugiere un mínimo de 8 a 12 años de observaciones de enfermedad para identificar con certeza los factores climáticos asociados. Si esto no fuera posible, se podría utilizar información meteorológica y de la enfermedad de varios sitios pertenecientes a una región geográfica, de manera de obtener variabilidad. En este sentido, Del Ponte et al. (2006) mediante técnicas de regresión lineal múltiple, ajustaron modelos basados en variables hídricas para predecir la severidad final de la roya asiática de la soja (*Phakopsora pachyrhizi*). Para ello, utilizaron datos de severidad (%) de sólo 3 campañas, pero de 34 experimentos de campo, en 21 sitios de Brasil. Moschini et al. (2006) utilizaron observaciones de incidencia de escudete negro (*Alternaria alternata* y *Bipolaris sorokiniana*) en trigo fideo, de 5 sitios y 3 campañas, para ajustar modelos predictivos de regresión lineal múltiple y logística basados en 2 variables meteorológicas.

Para el desarrollo de los mencionados modelos, se dispuso de observaciones de severidad de *Alternaria tenuissima* en arándano, las cuales trataron de representar su progreso epidémico durante los ciclos de crecimiento 2008/09 y 2009/10, en tres sitios geográficos (Concordia, Gualaguaychú y San Pedro). Si se hubiesen usado los valores máximos de severidad de cada ciclo de crecimiento, sólo se hubiese dispuesto de seis observaciones (3 sitios x 2 ciclos). Dicho número de observaciones es considerado insuficiente para establecer, a través

<sup>2</sup> Parásito que mata a las células y obtiene su energía de las células muertas (Dárcy et al., 2001).

de técnicas de regresión, la relación cuantitativa ambiente/enfermedad. Por ello se pensó entonces, en otra técnica de análisis que incluyera todas las observaciones disponibles de severidad de *Alternaria tenuissima* (n=29) a lo largo de los ciclos de crecimiento de arándano. En este marco, debido al excesivo e irregular espaciamiento temporal entre observaciones de la enfermedad, se consideró impreciso el proceso de identificación de variables ambientales relacionadas a las tasas diarias de incremento epidémico, calculadas entre observaciones sucesivas de severidad. Con las restricciones descritas, los objetivos fueron los siguientes:

1. Ajustar modelos linealizados (Logístico y Gompertz) a los datos de severidad observados por ciclo y sitio.
2. Estimar la severidad y la tasa de incremento epidémico diario a intervalos de tiempo fijos, a partir de las curvas epidémicas seleccionadas.
3. Desarrollar modelos empíricos mediante técnicas de regresión logística, para estimar probabilidades de ocurrencia de distintos niveles de tasas de incremento epidémico (severidad) de *Alternaria tenuissima* en hojas de arándano, basados en el grado de senescencia foliar y en variables meteorológicas (simples e interactivas).
4. Procesar dichas variables regresoras a intervalos de tiempo fijos, previos a cada valor de severidad, en la curva de progreso epidémico seleccionada por ciclo y sitio.

Para evaluar la asociación entre las variables regresoras con la epidémica, se desarrolló un programa basado en el lenguaje de programación del software *Statistical Analysis System* (SAS), el cual se viene utilizando con regularidad desde el año 1988 por Ricardo Moschini (Moschini y Fortugno, 1996; Moschini et al., 1996; Moschini et al., 1999; Moschini y Perez, 1999; Moschini et al., 2001; Moschini et al., 2002; Moschini et al., 2004; Moschini et al., 2006; Moschini, 2007), para la obtención de modelos predictivos de enfermedades de cultivos basados en variables meteorológicas.

### Modelos linealizados de ajuste a curvas de progreso epidémico

Mediante análisis de regresión lineal (procedi-

miento GLM del SAS) fue evaluada la bondad de ajuste de las formas linealizadas de los modelos Logístico (L) y Gompertz (G) (Campbell y Madden, 1990) a cada una de las 6 epidemias observadas (3 sitios y 2 campañas) (Cuadro 1).

Se analizaron para cada modelo el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y la raíz cuadrada del error cuadrático (RECM). La variable dependiente en la regresión lineal fue para L= $\ln(\text{sev}/(1-\text{sev}))$  y para G= $-\ln(-\ln(\text{sev}))$ , siendo "ln" el logaritmo natural y "sev" la severidad observada de la enfermedad en proporción, para cada fecha. La variable independiente es el tiempo (d) expresado en días que van transcurriendo desde una fecha inicial. El inicio de cada ciclo epidémico en los años 2008 y 2009, para los 3 sitios, coincidió con la fecha en la cual se acumulan 170 grados día desde el 1 de julio ( $T_m$  base=12,5°C). La temperatura media base es la utilizada para simular el desarrollo de las especies cítricas CDavies y Albrigo, 1994). Estas fechas supuestas de inicio epidémico fueron previas a la primera observación de cada ciclo epidémico por sitio (San Pedro: 27/9/08 y 2/10/09, Concordia: 1/9/08 y 31/8/09, Gualaquaychú: 17/9/08 y 20/9/09).

Resolviendo las siguientes ecuaciones se obtuvieron los valores de severidad (Sev) de cualquier día (d) en las curvas de progreso epidémico ajustadas:

**Modelo L:  $\text{Sev} = 1 / (1 + \exp(-(\text{intercepto} + \text{pendiente} * d)))$**

**Modelo G:  $\text{Sev} = \exp(-\exp(-\text{intercepto})) * \exp(-\text{pendiente} * d)$**

A partir de los modelos de progreso epidémico seleccionados, se obtuvieron valores estimados de severidad a intervalos de 14 días (el día 1 es la fecha de inicio epidémico definido por sitio y año). La tasa de incremento epidémico diario (TId%) resultó de:  $(\text{Sev}_d - \text{Sev}_{d-1}) / 14$ , siendo "d" el día que completa cada intervalo de 14 días, consecutivamente desde la fecha de inicio (el primer valor de TId% que se considera es el del día 15, desde el día inicial). Para el siguiente paso de desarrollo de modelos de regresión logística (variables meteorológicas y senescencia) sólo se utilizaron las curvas simuladas de progreso epidémico que observaron valores de  $R^2 > 0,65$  y RECM < 1,1.



**Sitio San Pedro: Ciclo 2008/09**

Fecha Observada	Día Juliano	Severidad	Severidad Acumulada (%)	Día Epidemia
27/09/08	271	0,001	0,1	1
27/11/08	332	0,0184	1,84	62
08/01/09	8	0,0238	2,38	104
09/03/09	68	0,1208	12,08	133

**Sitio San Pedro: Ciclo 2009/10**

Fecha Observada	Día Juliano	Severidad	Severidad Acumulada (%)	Día Epidemia
02/10/09	275	0,001	0,1	1
22/10/09	295	0,0066	0,66	21
03/12/09	337	0,0262	2,62	63
29/12/09	363	0,0590	5,90	89
03/02/10	34	0,0883	8,83	125
13/02/10	44	0,1056	10,56	135
17/04/10	107	0,1211	12,11	198

**Sitio Concordia: Ciclo 2008/09**

Fecha Observada	Día Juliano	Severidad	Severidad Acumulada (%)	Día Epidemia
1/09/08	245	0,001	0,1	1
23/11/08	297	0,0097	0,97	53
04/12/08	339	0,0144	1,44	95
06/01/09	6	0,1265	12,65	122
25/03/09	84	0,0957	9,57	200

**Sitio Concordia: Ciclo 2009/10**

Fecha Observada	Día Juliano	Severidad	Severidad Acumulada (%)	Día Epidemia
31/08/09	243	0,001	0,1	1
09/10/09	282	0,0088	0,88	40
16/11/09	320	0,0259	2,59	78
21/12/09	355	0,0461	4,61	113
28/01/10	28	0,0490	4,90	151
27/02/10	58	0,2814	28,14	181
27/03/10	86	0,2868	28,68	209

**Sitio Gualaguaychú: Ciclo 2008/09**

Fecha Observada	Día Juliano	Severidad	Severidad Acumulada (%)	Día Epidemia
17/09/08	261	0,001	0,1	1
25/11/08	330	0,1045	10,45	70
13/12/08	348	0,0894	8,94	88
02/01/09	2	0,1220	12,20	108
06/03/09	65	0,1141	11,41	171

<b>Sitio Gualeguaychú: Ciclo 2009/10</b>				
Fecha Observada	Día Juliano	Severidad	Severidad Acumulada (%)	Día Epidemia
20/09/09	263	0,001	0,1	1
07/10/09	280	0,0726	7,26	18
03/12/09	337	0,0840	8,40	75
28/12/09	362	0,0731	7,31	100
18/02/10	49	0,096	9,60	152
20/03/10	79	0,1063	10,63	182
24/04/10	114	0,1442	14,42	217

**Cuadro 1: Valores de severidad (en proporción y acumulado %) de *Alternaria tenuissima* observados en 6 ciclos epidémicos (3 sitios: Concordia, Gualeguaychú y San Pedro y 2 campañas).**

## Desarrollo de modelos de regresión logística

### Variable respuesta

Dicha variable se categorizó en Binaria (los valores de TId% de las curvas de progreso epidémico seleccionadas se categorizaron en función de un valor umbral en "severo" y "moderado a nulo") y Ordinal (ídem al caso anterior, aunque basado en tres categorías epidémicas: "severa", "moderada" y "ligera a nula". Dichos umbrales correspondieron a percentiles de los valores simulados cada 14 días.

Variables regresoras:

#### • Variables meteorológicas:

Las estaciones meteorológicas de San Pedro (INTA), Concordia (SMN) y Gualeguaychú (SMN), registraron diariamente la temperatura máxima (Tx: °C), temperatura mínima (Tn: °C), precipitación (Pr: mm) y humedad relativa (HR: promedio tridiurno). La temperatura media diaria (Tm) fue calculada como la semisuma de las temperaturas máxima y mínima. Basados en estos elementos se construyeron las siguientes variables meteorológicas: Simples e Interacciones (producto de 2 variables simples).

#### • Simples:

DTxnP: número de días con  $Tn > 16^{\circ}\text{C}$  y  $Tx < 36^{\circ}\text{C}$

DTnN: número de días con  $Tn \leq \text{umbral}$  (rango: 12 a  $18^{\circ}\text{C}$ )

DTxN: número de días con  $Tn \leq \text{umbral}$  (ran-

go: 12 a  $18^{\circ}\text{C}$ ) o  $Tx \geq \text{umbral}$  (rango: 32 a  $36^{\circ}\text{C}$ )

TxM: temperatura máxima media

TnM: temperatura mínima media

FPr: días con registros de  $Pr > 0,2$  mm

PrAc: acumulación de precipitaciones  $> 0,2$  mm

DPrHR: número de días con registros de  $Pr > 0,2$  mm y  $HR > \text{umbral}$  (rango: 65 a 85%)

DPrHRT: número de días con registros de  $Pr > 0,2$  mm y  $HR > \text{umbral}$  (rango: 65 a 85%), en el rango térmico:  $Tx < 36^{\circ}\text{C}$  y  $Tn > 16^{\circ}\text{C}$

DHR: número de días con  $HR > \text{umbral}$  (rango: 65 a 85%)

#### • Interacciones (producto de 2 variables simples):

It1 =  $FPr * DTxNP$

It2 =  $FPr * TnM$

It3 =  $DPrHRT * FPr$

It4 =  $DPrHRT * TnM$

#### • Variable ligada al grado de senescencia foliar (Snc):

Toma valores de 1 a 4 de acuerdo al cuartil en el que se encuentra la observación respecto a la duración máxima de las curvas de progreso epidémico analizadas por sitio (198 días en San Pedro, 209 días en Concordia y 171 días en Gualeguaychú). Por ejemplo, si en Concordia se está a 141 días del inicio de la epidemia simulada:  $141/209 = 0,67$  o sea tercer cuartil:  $Snc = 3$ .

Lapso de procesamiento de las variables

Las variables fueron procesadas en el lapso de 14 días previos a cada valor de TId%, a lo largo de cada curva de progreso epidémico.

## Análisis estadístico

1. Se calcularon los coeficientes de correlación de Kendall (rk) Tau-b (Proc Freq del SAS) (De Wolf et al., 2003) entre los niveles epidémicos (categorías de acuerdo a TId%) y las variables meteorológicas descriptas (simples e interacciones) y el factor de senescencia (Snc).

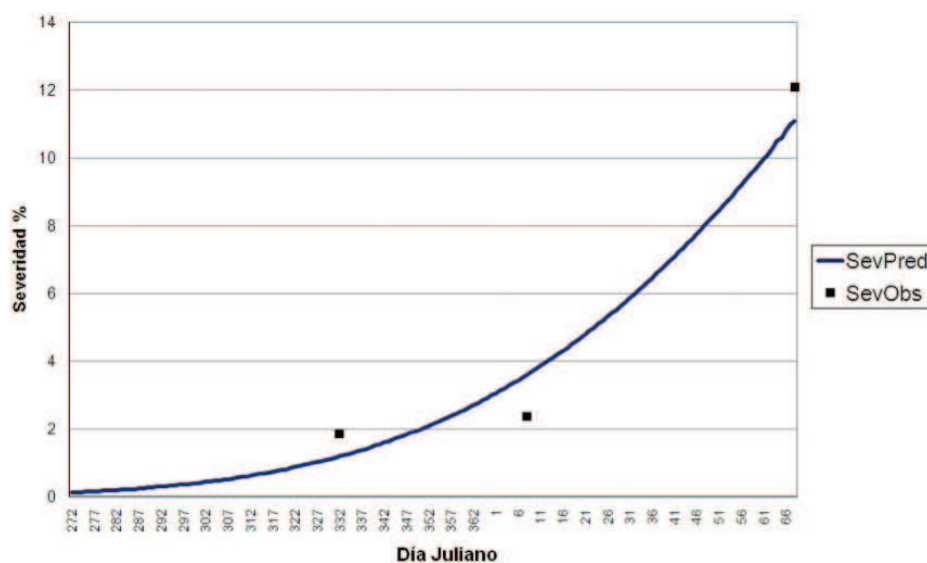
2. Mediante la técnica de regresión logística se estimó la probabilidad de ocurrencia de cada categoría epidémica en base a una o varias de las variables regresoras analizadas (simples o como componente interactivo) (Johnson et al., 1996; Turechek y Stevenson, 1998; De Wolf et al., 2003; Troglia et al., 2004; Henderson et al., 2007; Moschini, 2007; Carmona et al., 2010). Regla de decisión: se pronostica la categoría epidémica con una probabilidad asociada  $\geq 0,5$  (binaria) o con la máxima probabilidad asociada de ocurrencia (ordinal). En la evaluación de los mejores modelos de respuesta binaria se toma en cuenta el valor crítico P (valor de probabilidad para clasificar una categoría epidémica como severa que logra la mayor precisión de predicción), que no necesariamente es el valor 0,5. El procedimiento Logistic del SAS, fija modelos de regresión paralelos para datos de respuesta ordinaria por medio del método de máxima verosimilitud, basado en la distribución de probabilidad acumulada de los niveles de respuesta. Una función logit (logaritmo natural de  $(Pr/1-Pr)$ , siendo "Pr" la probabilidad acumulada de las categorías epidémicas) establece la unión entre el componente esto-

cástico y las variables regresoras meteorológicas analizadas. Los supuestos requeridos por el análisis de regresión lineal paramétrico, no se exigen en la regresión logística. El método de selección de variables Stepwise del procedimiento Logistic, fue usado para obtener el modelo más apropiado, haciendo jugar las variables (simples e interactivas) descriptas y fijando distintos niveles de significancia para entrar y permanecer en el modelo (NSE y NSP respectivamente).

3. La precisión de la predicción se basó en el porcentaje de casos correctamente clasificados. Si en cada uno de los casos analizados se compara la categoría epidémica observada versus la predicha, con máxima probabilidad de ocurrencia por las ecuaciones logísticas desarrolladas, se puede calcular el porcentaje de casos correctamente clasificados.

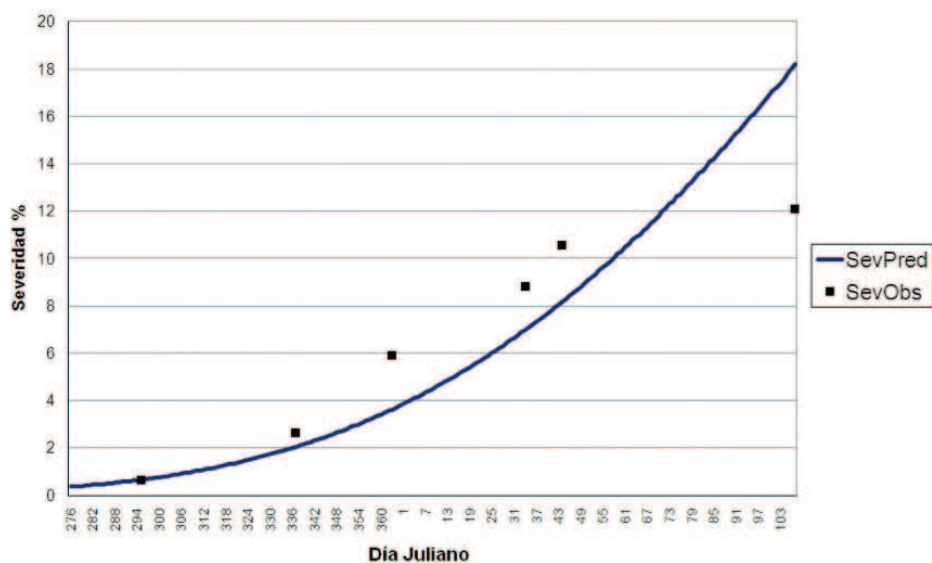
## Resultados y discusión

Sólo para San Pedro y Concordia, en ambos ciclos (2008/09 y 2009/10) y para Gualeguaychú en el ciclo 2008/09, se pudieron ajustar modelos linealizados Logístico y Gompertz con altos coeficientes de determinación y bajo error (Figuras 2, 3, 4, 5, 6 y Cuadro 2). Se desechó para el desarrollo de modelos predictivos, la información epidémica de Gualeguaychú correspondiente al ciclo 2009/10. Para este sitio, en la epidemia correspondiente a dicho ciclo (2009/10), el mejor modelo fue Gompertz, aunque obtuvo valores de  $R^2$  de sólo 0,54, los cuales se encuentran por debajo de los su-

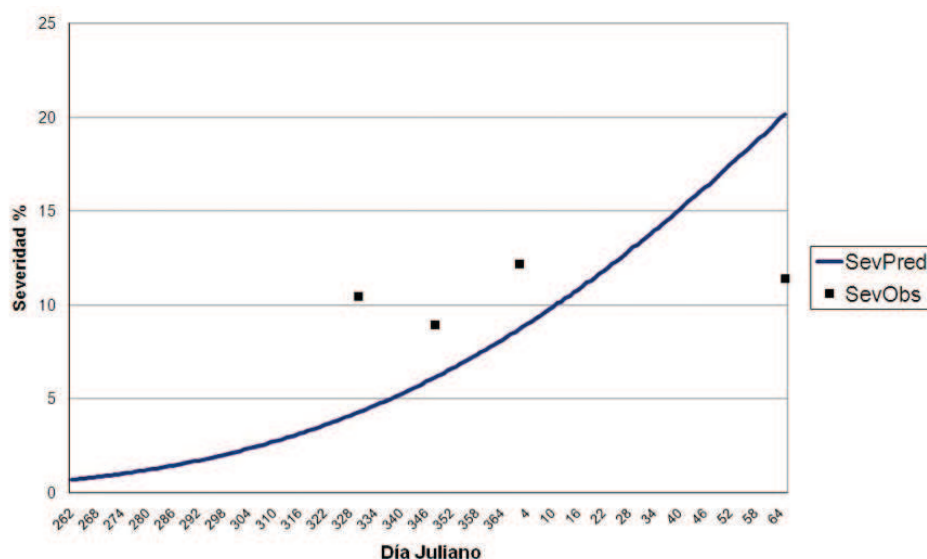


**Fig. 2. Severidad observada versus predicha para el ciclo epidémico San Pedro 2008/09**

E. Bombelli et al - Modelado para la predicción de enfermedades...







**Fig. 6. Severidad observada versus predicha para el ciclo epidémico Gualeguaychú 2008/09**

Sitio	Año	Modelo	N	R <sup>2</sup>	RECM	intercepto	Pendiente
Concordia	2008/09	L	5	0,80	1,04	-6,2619	0,0241
Concordia	2009/10	L	7	0,93	0,61	-6,265	0,0268
San Pedro	2008/09	G	5	0,96	0,12	-1,9184	0,0069
San Pedro	2009/10	G	7	0,89	0,16	-1,7415	0,0061
Gualeguaychú	2008/09	G	5	0,66	0,34	-1,6156	0,0067

**Cuadro 2. Resumen estadístico del análisis de regresión lineal usado en la evaluación de modelos Logísticos (L) y Gompertz (G) de mejor ajuste, para describir las epidemias observadas en Concordia, San Pedro y Gualeguaychú (ciclo 2008/09). Resolviendo las siguientes ecuaciones se obtienen los valores de Severidad en proporción:  $SevL=1/(1+\exp(-(-6,262+0,024*t)))$ ;  $SevL=1/(1+\exp(-(-6,265+0,027*t)))$ ;  $SevG=\exp(-\exp(1,9184)*\exp(-0,0069*t))$ ;  $SevG=\exp(-\exp(1,7415)*\exp(-0,0061*t))$ ;  $SevG=\exp(-\exp(1,6156)*\exp(-0,0067*t))$ . Dichas ecuaciones corresponden a Concordia y San Pedro (2008/09 y 2009/10) respectivamente y Gualeguaychú (2008/09).**

puestos iniciales ( $R^2>0,65$ ).

Los valores de TId% en función de umbrales, se categorizaron binariamente en severo ( $TId\% \geq 0,077$ ) y moderado a nulo ( $TId\% < 0,077$ ) y ordinalmente en severo ( $TId\% \geq 0,077$ ), moderado ( $TId\% < 0,077$  y  $\geq 0,038$ ) y ligero a nulo ( $TId\% < 0,038$ ), siendo 0,077 y 0,038 los percentiles 50 y 30% de los 65 valores de TId%.

Las correlaciones (rk: coeficiente de Kendall Tau-b) entre los niveles de tasas de incremento epidémico, las variables meteorológicas y el factor de senescencia (Snc) analizadas, se presentan en el Cuadro 3.

Las variables meteorológicas simples como

DTnN (días con temperatura mínima  $\leq 16^\circ\text{C}$ ), DTxNP (días con temperatura máxima  $< 36^\circ\text{C}$  y temperatura mínima  $> 16^\circ\text{C}$ ), TnM (temperatura mínima media) y el factor de senescencia (Snc), alcanzaron los más altos coeficientes correlación de Kendall ( $rK > 0,49$ ). Las variables simples asociadas a elementos meteorológicos de naturaleza continua, como las térmicas, presentaron las más elevadas correlaciones con los niveles de enfermedad. Variables ligadas a elementos discretos, como las relacionadas a la precipitación, tuvieron menor grado de asociación con las tasas de incremento epidémico. Ello puede explicarse dado que el primer lapso primaveral de las curvas de progreso simuladas por los modelos Logísticos y Gompertz, se caracterizó por observar un lento

Respuesta binaria		Respuesta ordinal	
Variables	$r_k$	Variables	$r_k$
<i>Simples</i>		<i>Simples</i>	
DTxnP	0,52	DTxnP	0,60
DTnN	-0,49	DTnN	-0,59
DTxnN	-0,52	DTxnN	-0,60
TxM	0,39	TxM	0,46
TnM	0,49	TnM	0,57
FPr	0,14	FPr	0,17
PrAc	0,18	PrAc	0,18
DPrHR	0,17	DPrHR	0,19
DPrHRT	0,36	DPrHRT	0,40
DHR	0,25	DHR	0,24
<i>Interactivas</i>		<i>Interactivas</i>	
It1	0,40	It1	0,49
It2	0,29	It2	0,34
It3	0,33	It3	0,37
It4	0,36	It4	0,41
<i>Senescencia foliar</i>		<i>Senescencia foliar</i>	
Snc	0,76	Snc	0,81

**Cuadro 3.** Coeficientes de correlación de Kendall ( $r_k$ ) Tau-b de variables meteorológicas (simples e interacciones) y del factor ligado a la senescencia foliar (Snc) en relación a los niveles de tasa de incremento epidémico diario (TId%) binarios (severo y ligero a nulo) y ordinales (severo, moderado y ligero a nulo). DTxnP: número de días con  $T_n > 16^\circ\text{C}$  y  $T_x < 36^\circ\text{C}$ ; DTnN: número de días con  $T_n \leq 16^\circ\text{C}$ ; DTxnN: número de días con  $T_n \leq 16^\circ\text{C}$  o  $T_x \geq 36^\circ\text{C}$ ; TxM: temperatura máxima media; TnM: temperatura mínima media; FPr: días con registros de  $Pr > 0,2$  mm; PrAc: se acumulan las precipitaciones  $> 0,2$  mm; DPrHR: número de días con registros de  $Pr > 0,2$  mm y  $HR > 65\%$ ; DPrHRT: número de días con registros de  $Pr > 0,2$  mm y  $HR > 65\%$ , en el rango térmico:  $T_x < 36^\circ\text{C}$  y  $T_n > 16^\circ\text{C}$ ; DHR: número de días con  $HR > 65\%$ ; Interacciones: It1=FPr\*DTxnP; It2=FPr\*TnM; It3=DPrHRT\*FPr; It4=DPrHRT\*TnM; Snc: factor de senescencia: valores de 1 a 4 (primer a cuarto cuartil del ciclo epidémico).

Modelo	Ecuaciones del Modelo*	Precisión (%)
<i>Respuesta Binaria</i>		
<b>I</b>	LogitPrS= - 3,4412 + 0,4172*DTxnP	78,5
<b>II</b>	LogitPrS= - 10,8126 + 4,2892*Snc	93,8
<b>III</b>	LogitPrS= -14,2559+4,7867*Snc+0,2043*It4+0,3672*DTnN-3,1527*DPrHR	95,4
<i>Respuesta Ordinal</i>		
<b>IV</b>	LogitPrS= - 4,1985 + 0,4955*DTxnP LogitPrMac= - 2,5761 + 0,4955*DTxnP	70,8
<b>V</b>	LogitPrS= - 11,6675 + 4,6174*Snc LogitPrMac= - 8,6741 + 4,6174*Snc	83,1
<b>VI</b>	LogitPrS= -12,8144 + 4,5697*Snc + 0,0338*It1 LogitPrMac= - 9,4060 + 4,5697*Snc + 0,0338*It1	86,2

**Cuadro 4. Modelos logísticos para estimar la probabilidad de ocurrencia de cada categoría de nivel de tasa de incremento epidémico diario (TId%): Binaria: severa (S) y moderada a nula (M); Ordinal: severa (S), moderada (M) y ligera a nula (L), en base a variables meteorológicas simples e interacciones y a un factor de senescencia foliar (Snc). \*LogitPrS= $\ln(\text{PrS}/(1-\text{PrS}))$ ; LogitPrMac= $\ln(\text{PrMac}/(1-\text{PrMac}))$ . Resolviendo las expresiones  $\text{Exp}(\text{LogitPrS})/(1+\text{Exp}(\text{LogitPrS}))$  y  $\text{Exp}(\text{LogitPrMac})/(1+\text{Exp}(\text{LogitPrMac}))$  se obtienen los valores de PrS (probabilidad de observar un nivel de TId% severo (S)) y PrMac (probabilidad acumulada de ocurrencia de un nivel de TId%=> a la categoría moderada (M)). "ln" es el logaritmo natural. PrM=PrMac-PrS. PrL=1-(PrS+PrM) siendo "PrL" la probabilidad de observar un nivel de incremento epidémico ligero a nulo (L). DTxNP: número de días con Tn>16°C y Tx<36°C; DTnN: número de días con Tn<=16°C; DPrHR: número de días con registros de Pr>0,2 mm y HR>65%; DPrHRT: número de días con registros de Pr>0,2 mm y HR> 65%, en el rango térmico: Tx<36°C y Tn>16°C; FPr: días con registros de Pr>0,2 mm; Interacciones: It1=FPr\*DTxNP; It4=DPrHRT\*TnM Snc: factor de senescencia: valores de 1 a 4 (primer a cuarto cuartil del ciclo epidémico).**

y uniforme ritmo de incremento. Esta situación se acopla perfectamente a la normal ocurrencia de días con temperaturas bajas (alto valor de DTnN: temperaturas <=16°C) y hojas jóvenes (bajo factor de Snc). En cambio, en el verano, las pendientes de las curvas simuladas son muy elevadas, concordando con hojas de senescencia creciente (alto valor de Snc) y alta frecuencia de días con temperaturas entre 16 y 36°C (alto valor de DTxNP). Las variables ligadas a elementos de ocurrencia esporádica y errática, como la precipitación, no realizaron aportes significativos como para explicar el comportamiento uniforme, característico de los dos subperíodos de la curva epidémica (bajos valores de rK).

La alta correlación de las variables térmicas con la enfermedad, coincide con lo expresado por Milholland (1973), quien afirma que la temperatura es el principal factor meteorológico, aunque no el único, responsable de la infección y desarrollo de la enfermedad, no sólo a campo sino también in vitro, siendo la temperatura óptima para el desarrollo de la enfermedad 20°C y para el crecimiento del hongo 28°C. Dicha afirmación, compete a cultivos de arándano alto en el estado de Carolina del Norte. Rivera et al. (2009) señalaron que la mancha foliar es una enfermedad prevalente en tejidos senescentes viejos, justificando la correlación positiva encontrada en el presente estudio entre Snc y los niveles de incremento epidémico diario.

Mediante el procedimiento Logistic del SAS, se ajustaron diferentes modelos de respuesta bi-

na y ordinal (Cuadro 4). Las mayores precisiones de predicción se lograron con modelos de respuesta binaria. El modelo I fue el que logró la mayor precisión de predicción, cuando sólo se analizaron variables estrictamente meteorológicas como DTxNP. El modelo II, que sólo incluyó al factor de senescencia (Snc), clasificó correctamente 61 de las 65 observaciones de tasas de incremento epidémico diario (93,8%). Esta precisión de predicción sólo fue superada por el modelo III, que integró, además del factor de senescencia (Snc), a las variables meteorológicas simples "DTnN" y "DPrHR" y al componente interactivo surgido del producto entre "DPrHRT\*TnM" (95,4%).

Respecto a los modelos de respuesta ordinal, gradualmente los univariados a bivariados (modelos IV a VI), fueron mejorando la precisión de predicción desde 70,8% a 86,2%. Analizando sólo variables meteorológicas (simples e interacciones), el mejor modelo fue aquel que incluyó a DTxNP (modelo IV, P=0,47), logrando clasificar correctamente 46 de las 65 tasas de incremento epidémico. Se destacó el modelo univariado V, que sólo integró al factor de senescencia "Snc", clasificando correctamente 54 casos de 65. El modelo VI que integra a "Snc" y a la interacción entre "FPr\*DTxNP", predijo erróneamente sólo 9 casos de los 65 analizados (P=0,45). Los modelos II y V fueron seleccionados por el método Stepwise (0,05 para NSE y NSP) cuando se hicieron intervenir todas las variables meteorológicas (simples e interactivas) y el factor Snc.

## Conclusiones

A través de los resultados de estos modelos fue posible explicar y cuantificar el lento progreso epidémico (observado y simulado) de las manchas foliares en la primavera (tiempo fresco y hojas jóvenes). Para este subperíodo, los modelos estimaron frecuentemente valores muy altos de probabilidad de tasas de incremento leves a nulas. Concordando con las elevadas pendientes de la curva de progreso epidémico estival (hojas de senescencia creciente y tiempo templado a cálido), las salidas de los modelos estimaron predominantemente para este lapso, valores altos de probabilidad de ocurrencia de tasas de incremento epidémico severas.

La continuidad de la investigación, sobre la

mitan el ajuste y validación de los modelos predictivos desarrollados, como parte de un sistema de pronóstico, que admita la representación de los resultados (mapas), así como también su difusión (Internet), constituye, sin lugar a dudas, un aporte más al manejo integrado de enfermedades de las plantas, siendo también el primero de los antecedentes en materia de desarrollo de modelos predictivos de enfermedades en cultivos intensivos en la Argentina.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a los tesisistas de grado que participaron en la colecta de datos de severidad con ética, responsabilidad y profesionalismo, sin los cuales no hubiese sido posible la concreción de este trabajo.

## Referencias:

- CAMPBELL, C.L. y MADDEN, L.V., (1990) Introduction to plant disease epidemiology. Wiley, New York. 532p.
- CARMONA, M.; MOSCHINI, R.; CAZENAVE, G. y SAUTUA, F., (2010) Relación entre la precipitación registrada en estados reproductivos de la soja y la severidad de *Septoria glycines* y *Cercospora kikuchii*. *Tropical Plant Pathology*. 35(2): 71-78.
- COAKLEY, S.M., (1988) Variation in climate and prediction of disease in plants. *Annual Review of Phytopathology*. 26:163-181.
- DÁRCY, C.J.; EASTBURN, D.M. y SCHUMAN, G.L., (2001) Illustrated glossary of plant pathology. The American Phytopathological Society. Education Center. [www.apsnet.org](http://www.apsnet.org).
- DAVIES, F.S. y ALBRIGO, L.G., (1994) Citrus. *Crop Production Science in Horticulture*. Vol 2, CAB International, Wallingford, UK. 254p.
- DE WOLF, E.D. e ISARD, S.A., (2007) Disease cycle approach to plant disease prediction. *Annual Review of Phytopathology*. 45(9):1-18.
- DE WOLF, E.D.; MADDEN, L.V. y LIPPS, P.E., (2003) Risk assessment models for wheat Fusarium head blight epidemics based on within-season weather data. *Phytopathology*. 93:428-435.
- DEL PONTE, E.M.; GODOY, C.V.; LI, X. y YANG, X.B., (2006) Predicting severity of Asian soybean epidemics with empirical rainfall models. *Phytopathology*. 96:797-803.
- GAUMANN, E., (1950) Principles of Plant Disease Infection. Hafner, New York. 543p.
- HENDERSON, D.; WILLIAMS, C.J. y MILLER, J.S., (2007) Forecasting late blight in potato crops of southern Idaho using logistic regression analysis. *Plant Disease*. 91: 951-956.
- HYRE, R.A., (1954) Progress in forecasting late blight of potato and tomato. *Plant Disease Reporter*. 38:245-253.
- JOHNSON, D.A.; ALLDREDGE, J.R. y VAKOCH, D.L., (1996) Potato late blight forecasting models for the semiarid environment of south-central Washington. *Phytopathology*. 86:480-484.
- KRANZ, J., (2003) Comparative Epidemiology of Plant Diseases. Springer, New York. 212.
- MALLOY, O.C., (1993) Plant Disease Control. Wiley, New York. 351-356.
- MILHOLLAND, R.D., (1973) A leaf spot disease of highbush blueberry caused by *Alternaria enuissima*. *Phytopathology*. 63: 1395-1397.
- MOSCHINI, R.C., (2007) Los cultivos de Soja y Trigo: Herramientas para la predicción y manejo de enfermedades en la Argentina. p. 39-48. En *Mundo Agro*. Intensificación de los sistemas de producción y el manejo del riesgo en agricultura. Incorporando nuevas tecnologías al manejo de los cultivos. Buenos Aires.



MOSCHINI, R.C. y FORTUGNO, C., (1996) Predicting wheat head blight incidence using models based on meteorological factors in Pergamino, Argentina. *European Journal of Plant Pathology*. 102:211-218.

MOSCHINI, R.C. y PEREZ, B.A., (1999) Predicting wheat leaf rust severity using planting date, genetic resistance, and weather variables. *Plant Disease*. 83:381-384.

MOSCHINI, R.C.; CARMONA, M. y GRONDONA, M., (1999) Wheat head blight incidence variations in the Argentinian Pampas region associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Actas Simposio Israel*.

MOSCHINI, R.C.; CARMONA, M.; BARRETO, D. y CONTI, H.A., (1996) Modelos de predicción de la incidencia de la mancha en red de la cebada cervecera basados en variable meteorológicas: evaluación del potencial climático de la región pampeana respecto a la enfermedad. *Fitopatología. Brasil*. 21(3).

MOSCHINI, R.C.; CARRANZA, M.R. y CARMONA, M.A., (2004) Meteorological-based predictions of wheat head blight epidemic in the southern Argentinean pampas region. *Cereal Research Communication* 32:45-52.

MOSCHINI, R.C.; ESCANDE, A.R.; PEREYRA, V.R.; PEDRAZA, V.; QUIROZ, F.; TROGLIA, C. e IRIARTE, I., (2002). Predicción de la incidencia de la podredumbre blanda del capítulo de girasol en base a factores ambientales y genéticos. *Revista Argentina de Agrometeorología*. 2(1):51-57.

MOSCHINI, R.C.; PIOLI, R.; CARMONA, M. y SACCHI, O., (2001) Empirical predictions of wheat head blight in the northern Argentinian Pampas region. *Crop Science*. 41:1541-1545.

MOSCHINI, R.C.; SISTERNA, M.N. y CARMONA, M., (2006) Modelling of wheat black point incidence based on meteorological variables in the southern Argentinean Pampas Region. *Australian Journal of Agricultural Research*. 57(11):1151-1156.

RIVERA, M.C.; WRIGHT, E.R.; PÉREZ, B.A.; GONZÁLEZ RABELLINO, P. y PÉREZ, J.A., (2009). Enfermedades del arándano. p. 1-68. En: Wright, E.R. (ed.). *Guía de enfermedades, plagas y malezas del arándano*. Orientación. Buenos Aires.

STRANGE, R.N. y SCOTT, P.R., (2005) Plant disease: a threat to global food security. *Annu. Rev. Phytopathology*. 43:83-116.

TROGLIA C.; ESCANDE, A.R.; MOSCHINI, R.C.; DAMIANO, F. y QUIROZ, F., (2004) Modelos logísticos basados en variables térmicas e hídricas para simular la dinámica de la producción de inóculo de *Sclerotinia sclerotiorum* en suelos con rastrojo de girasol. *Actas X Reunión Nacional de Agrometeorología*. Mar del Plata.

TURECHEK, W.W. y STEVENSON, K.L., (1998) Effects of host resistance, temperature, leaf wetness duration and leaf age on infection and lesion development of pecan scab. *Phytopathology*. 88:1294-1301.

WRIGHT, E.R. y PÉREZ, J.A., (2007) Enfermedades del arándano. Publicado en CD. XXX Congreso Argentino de Horticultura. La Plata. Buenos Aires.

WRIGHT, E.R.; FERNÁNDEZ, R.L.; BENVA, M.; PÉREZ, J.A.; RIVERA, M.C.; RONCORONI, S.; NICOLINI, F.; VASQUEZ, P.E.; CIURCA, P. y PÉREZ, B.A., (2010) Deterioro poscosecha de arándano en Entre Ríos y Buenos Aires, Argentina. p. 63-68. En: Divo de Sesar, M.; Rocca, M.; Vilella, F. (eds.) *Avances en cultivos frutales no tradicionales. Arándanos-Cerezas-Frutillas-Granadas*.

WRIGHT, E.R.; PÉREZ, B.A.; FERNÁNDEZ, R.L.; ASCIUTTO, K.; RIVERA, M.C.; MURILLO, F.; VASQUEZ, P.; DIVO DE SESAR, M.; PÉREZ, A.; AGUILAR HEREDIA, L.; ROSATO, M.F.; CRELIER, A. y BALDOMÁ, J., (2005) Conocimiento actual sobre enfermedades de arándano. Libro de Resúmenes. 113-117. I Congreso Latinoamericano de Arándanos y otros berries. Buenos Aires.

WRIGHT, E.R.; RIVERA, M.C.; ESPERÓN, J., (2003-b) *Alternaria tenuissima* y *Colletotrichum gloeosporioides*: agentes causales de ablandamiento poscosecha en frutos de arándano. Resumen en CD. Código Fr 028. XXVI Congreso Nacional de Horticultura. Paraná. Entre Ríos.

WRIGHT, E.R.; RIVERA, M.C.; ESPERÓN, J.; CHEHEID, A. y RODRÍGUEZ CODAZZI, A., (2004). *Alternaria* leaf spot, twig blight and fruit rot of highbush blueberry in Argentina. *Plant Disease*. 88:1383.

WRIGHT, E.R.; VASQUEZ, P.; ASCIUTTO, K.; PÉREZ, A.; DIANO, M.; CIURCA, P.; DAMIENS, J.; CRELIER, A.; PANIGO, L.; BARRIENTOS, M.E.; RIVERA, M.C. y PÉREZ, B.A., (2007). Hongos presentes en el estado vegetativo de plantaciones de arándano (*Vaccinium corymbosum*) en Argentina. Código 147. 11º Congreso Nacional de Horticultura. Montevideo. Uruguay.

